

Foto: Moacyr José Vaz de Sousa



Influência da Umidade na Resistência do Solo Medida com Penetrômetro de Impacto

Carlos Manoel Pedro Vaz¹
Odo Primavesi²
Vinícius Carvalho Patrizzi³
Murilo de Freitas Iossi⁴

Penetrômetros

Penetrômetros ou penetrógrafos são instrumentos que medem a resistência à penetração em unidades de pressão (força/área) de um cone padrão (ASAE, 1994) posicionado na extremidade de uma haste de metal, quando inseridos no interior do solo. Essa resistência à penetração está relacionada à resistência exercida pelo solo à penetração e crescimento das raízes e, portanto, pode ser utilizada como uma medida da compactação dos solos.

Esses instrumentos podem ser divididos em 2 grupos, de acordo com o tipo de penetração no interior do solo: i) estáticos, quando a penetração é realizada com velocidade constante, com um sistema hidráulico ou elétrico-eletrônico ou mesmo manual (neste caso o usuário tenta imprimir uma penetração no solo com velocidade constante, o que na maioria das vezes é difícil de se obter) e ii) dinâmicos ou penetrômetros de impacto onde a penetração é proporcionada por impactos de um corpo metálico. Os penetrômetros estáticos são os mais utilizados em ciência do solo e agronomia e são equipamentos caros e sofisticados quando em versões automáticas e no caso das versões manuais tem-se a dificuldade da inserção com velocidade constante. O segundo grupo, o dos dinâmicos, tem sido bem menos utilizados, de um modo geral, no mundo, em estudos

agronômico, sendo mais aplicados em avaliações de solos para fins de construção de estradas e geotecnia. Entretanto, no Brasil, na década de 80, o Planalsucar/IAA, através dos trabalhos pioneiros do Dr. Rubsmar Stolf, desenvolveu um penetrômetro de impacto (Stolf, 1991) para uso na avaliação da compactação do solo com ênfase na cultura da cana-de-açúcar. O equipamento é atualmente comercializado pela indústria Kamaq e tem sido relativamente bastante utilizado para a avaliação da compactação de solos agrícolas. Além disso, recentemente foi publicado um trabalho na revista Soil Science Society of America Journal (Herrick & Jones, 2002), indicando diversas vantagens na utilização de penetrômetros dinâmicos.

As principais vantagens dos penetrômetros de impacto são seu baixo custo, possibilidade de se trabalhar em solos de alta resistência (com baixa umidade e altos teores de argilas) e solos pedregosos. Como desvantagens tem-se uma menor quantidade de trabalhos na literatura internacional e a hipótese lançada por alguns autores, de que os penetrômetros estáticos simulam melhor o processo de penetração das raízes nos solos (Bradford, 1986). No Brasil, diversos grupos de pesquisa tem trabalhado no desenvolvimento de penetrógrafos hidráulicos automáticos, mas é preponderante o uso de penetrômetros de impacto em estudos de manejo de solos e compactação.

¹Físico, PhD, Embrapa Instrumentação Agropecuária, Caixa Postal 741, CEP 13560-970, São Carlos-SP
²Engenheiro Agrônomo, Embrapa Pecuária Sudeste, Caixa Postal 339, CEP 13560-970, São Carlos-SP
³Estudante de Agronomia, FAEF, R. das Flores 754, Garça-SP
⁴Estudante de Agronomia, USP/ESALQ, Caixa Postal 9, CEP 13418-970, Piracicaba-SP

Uma questão que tem dificultado bastante o uso de penetrômetros é a dependência da resistência à penetração com a umidade. Em geral, recomenda-se que se faça a medida em condição de umidade nem muito alta nem muito baixa, preferencialmente na capacidade de campo. Entretanto, essa recomendação não resolve o problema. O ideal seria medir a umidade no momento da sondagem do penetrômetro e posteriormente se efetuar algum tipo de correção ou normalização para um valor constante de umidade. Outro aspecto é que ainda não é bem conhecida a dependência da RP com uma faixa larga de umidades e também a influência do tipo de solo nessa dependência.

Neste sentido, este comunicado técnico apresenta as correlações entre RP e para os 6 solos de maior ocorrência no Estado de São Paulo e discute os resultados, visando o estabelecimento de um procedimento para a padronização e correção da medida do penetrômetro, possibilitando comparações de resultados em condições de umidades equivalentes.

Teoria da penetrometria dinâmica

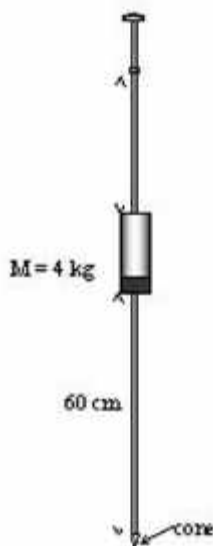


Figura 1. Esquema de um penetrômetro de impacto.

A Figura 1 mostra um esquema de um penetrômetro de impacto, composto de uma haste metálica com o cone na sua extremidade e o corpo metálico utilizado para o impacto ($M = 4\text{ kg}$). Durante o impacto a energia potencial do corpo metálico armazenada pela elevação a uma altura conhecida é usada para inserir a haste com o cone no solo. A profundidade de penetração obtida pela aplicação de uma quantidade de energia constante é usada para medir a resistência à penetração do solo (RP). A RP pode ser determinada considerando que a energia potencial do corpo metálico é convertida em trabalho de penetração do cone. A energia potencial total do sistema após o impacto é igual à energia potencial do corpo metálico a uma altura h (m), mais a energia potencial da distância da penetração x (m). Considerando a perda de energia devido ao impacto e uma colisão inelástica do corpo metálico, obtêm-se a seguinte expressão:

$$Fx = (M \cdot g \cdot h) \cdot f + (M + m) \cdot g \cdot x \quad (1)$$

onde F (N) é a força de penetração, x (m) é a distância de penetração após cada impacto, M (kg) e m (kg) a massa do corpo metálico de impacto e do restante do penetrômetro (hastes, cones e demais peças), respectivamente e g (m s^{-2}) é a aceleração da gravidade. O termo da esquerda descreve o trabalho de penetração devido a um único impacto e os termos da direita representam a energia potencial do corpo metálico multiplicado por um fator (f) que descreve a perda de energia e a energia potencial do penetrômetro após a colisão. O fator de perda de energia f é determinado pela razão da energia cinética do sistema imediatamente antes (K_b) e depois (K_a) da colisão (Eq. 2) e pode ser descrito usando a lei de conservação do momento linear (Eq. 3):

$$f = \frac{K_a}{K_b} = \left(\frac{M + m}{M} \right) \left(\frac{v_a}{v_b} \right)^2 \quad (2)$$

$$Mv_b = (M + m)v_a \quad (3)$$

Após a substituição da Eq. 3 em 2, obtêm-se:

$$f = \frac{M}{M + m} \quad (4)$$

A RP (Pa) é obtida da combinação das Eqs. 4 e 1, o qual produz, após a divisão da força de penetração F pela área do cone A (m^2):

$$RP = \left(\frac{M \cdot g \cdot h}{A \cdot x} \right) \cdot \left(\frac{M}{M + m} \right) + \left(\frac{M + m}{A} \right) \cdot g \quad (5)$$

O penetrômetro da Kamaq, possui as seguintes características: $M = 4\text{ kg}$, $m = 3,2\text{ kg}$, $f = 0,556$ e $A = 1,29 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Considerando um valor de $h = 0,4 \text{ m}$ e $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$, obtêm-se uma equação para o cálculo de RP, para cada impacto (Eq. 6). Conhecendo-se a profundidade atingida a cada impacto, é possível obter um gráfico de RP(MPa) ao longo da profundidade.

$$RP = 0,5475 + \frac{0,067651}{x} \quad (6)$$

Entretanto, a medida da resistência à penetração é altamente dependente da variabilidade espacial local, sendo que buracos de formigas e outros insetos, pedras e outros, podem provocar uma variação local indesejável na medida. Assim, é recomendável que se façam repetições para uma caracterização local mais adequada.

Considerando a alta variabilidade em geral encontrada entre repetições, surge um problema na realização de médias entre medidas utilizando a Eq. 6, pois os pontos das profundidades dificilmente se repetem. Visando resolver este problema, recomenda-se a realização das medidas de uma forma diferente, fixando-se um intervalo de profundidade e medindo-se o número de impactos para se atingir tal profundidade. Considerando-se, por exemplo, intervalos de 5 cm, define-se N = número impactos para um deslocamento de 5 cm e a equação 6 torna-se:

$$RP = 0,5475 + 1,353 \cdot N \quad (7)$$

Influência da umidade na resistência

A dependência da RP com a umidade tem sido estudada por diversos autores e para o modelamento desta relação, diversas equações e funções tem sido sugeridas e utilizadas. Busscher et al. (1997) testou

diversos modelos e concluiu que funções exponenciais e de potência são as que melhor expressam as relações entre RP e θ . Além da umidade, outros parâmetros como a densidade do solo, a textura e o teor de matéria orgânica podem influenciar na medida de RP. Upadhyaya et al. (1982) derivou uma equação relacionando RP com a umidade e densidade dos solos e das partículas dos solos, como fatores preponderantes:

$$RP = a \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_p} \right)^n \exp(-b \cdot \theta) \quad (8)$$

onde a , n e b são parâmetros de ajuste e dependem, em princípio, do tipo de solo.

Neste comunicado técnico iremos testar a validade da equação de Upadhyaya para 6 solos de diferentes texturas. Os experimentos foram conduzidos na Embrapa Pecuária Sudeste, com os seguintes solos: Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), Latossolo Vermelho distrófico (LVdf), Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Argissolo Vermelho Amarelo distrófico (PVAd) e Nitossolo Vermelho eutroférrico (NVef). Algumas características físicas desses solos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físicas dos solos utilizados neste estudo.

Solo	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)		pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³
			total	gua		
NQo	86	6	8	6	4,6	11
LVdf	43	8	49	18	4,7	54
LVAd	62	6	32	14	4,3	31
LVd	43	10	47	22	5,5	37
PVAd	70	6	24	18	4,9	23
PVAbt	43	6	51	33	4,7	11
NVef	18	16	66	49	4,6	39

Medidas da resistência à penetração com um penetrômetro de impacto da marca Kamaq foram realizadas nesses solos em épocas secas e úmidas visando a obtenção de uma ampla faixa de variação de umidades. Foram realizadas 4 medições para cada ponto de amostragem, visando minimizar a variabilidade espacial local, anotando-se o número de impactos para cada 5 cm de deslocamento, desde a superfície até 60 cm de profundidade. Após cada medida, foram coletados cilindros de solo indeformado (aço, 5 cm de altura e 2 polegadas de diâmetro para a medida da umidade volumétrica e densidade a cada 5 cm, desde a superfície até 60 cm, totalizando 12 amostras por perfil de solo.

A Figura 2 mostra a dependência entre a RP e a umidade para os 6 solos estudados. Observa-se uma diminuição exponencial da RP com o aumento da umidade, conforme descrito matematicamente na Eq. 8 (Upadhyaya et al. 1982). Entretanto, observa-se também uma dispersão considerável dos pontos, o que é atribuído à variação da densidade ao longo da profundidade e entre os locais amostrados. A distância entre os pontos amostrados, com diferentes condições de umidade foi de cerca de um metro, para um mesmo solo, mas mesmo assim, ocorre uma variação espacial natural considerável da densidade (Figura 3 e Tabela 2). As diferenças de comportamentos observadas entre os solos é devido às distintas estruturas, agregações e mineralogias desses solos, fazendo com que solos com mesma umidade apresentem resistências muito distintas. Por exemplo, o solo NQo (mais arenoso) apresenta um valor de RP=5 MPa em aproximadamente 10 % de umidade, enquanto

que o solo NVef (mais argiloso) apresenta o mesmo valor de RP para uma umidade de cerca de 35 %.

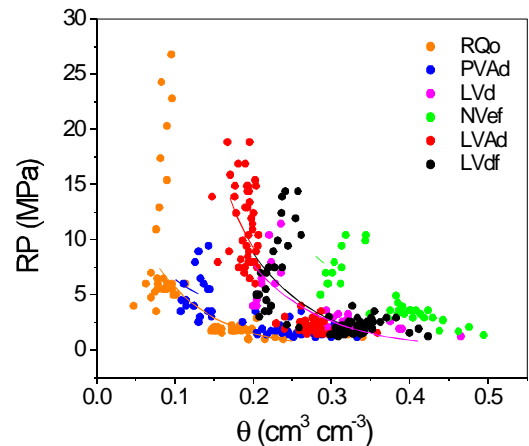


Figura 2. Variação da resistência à penetração com a umidade de 6 solos

A Figura 3 mostra a distribuição de frequências das densidades das amostras de solos coletadas a cada 5 cm de profundidade, para os 6 solos e a Tabela 2 a estatística básica dessas medidas. O solo com a menor variação de densidade entre as amostras foi o PVAd. Para um melhor modelamento da relação entre RP, θ e ρ , é importante que haja uma variação considerável desses parâmetros.

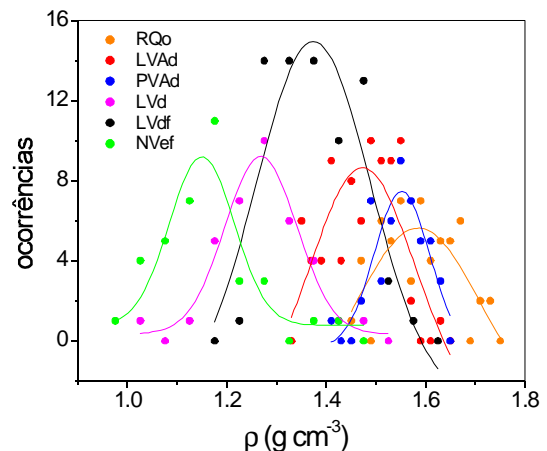


Figura 3. Distribuições de frequência da densidade das amostras de solo.

Tabela 2. Parâmetros estatísticos da distribuição da densidade dos solos

Solo	N	Densidade do solo (g cm ⁻³)						
		M dia	DP	Moda	Largura	M nima	M xima	Varia o
RQo	57	1,587	0,069	1,585	0,246	1,460	1,735	0,275
PVAd	48	1,548	0,050	1,552	0,110	1,640	1,640	0,236
LVd	36	1,271	0,088	1,269	0,144	1,041	1,467	0,426
NVef	36	1,153	0,088	1,149	0,130	0,972	1,402	0,430
LVAd	82	1,469	0,067	1,473	0,210	1,343	1,635	0,291
LVdf	72	1,367	0,094	1,369	0,453	1,197	1,595	0,398

N: número de pontos; DP: desvio padrão; Largura: largura da gaussiana à meia altura;

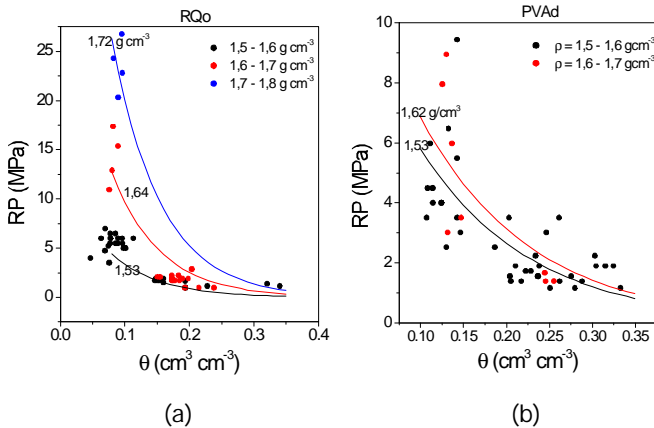
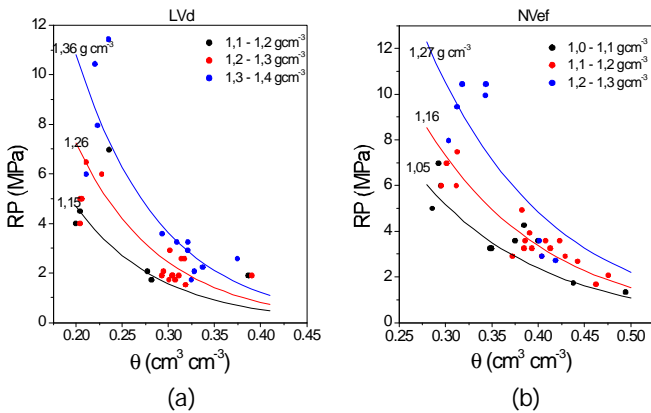
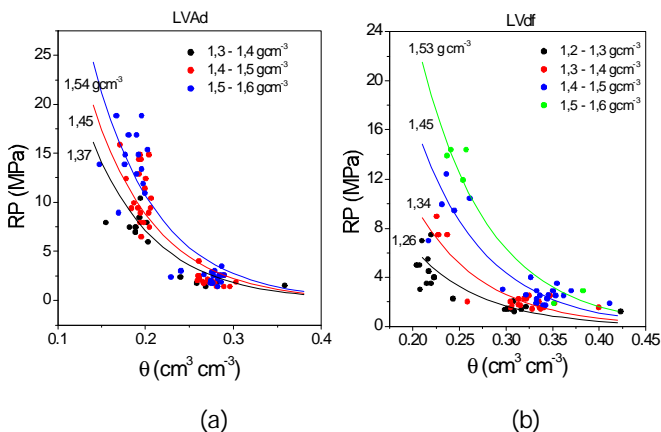
Variação: diferença entre densidade máxima e mínima

Uma vez que há uma grande variação de θ e uma variação considerável de ρ , refletindo numa grande variação de RP, torna-se possível ajustar a Eq. 8 nos dados experimentais da Fig. 2, com boa precisão, obtendo-se os parâmetros de ajuste a , n e b , apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de ajuste da Equação 8 nos dados da Figura 2.

Solo	a	n	b	EPE (MPa)
RQo	51498,74	15,4212	13,4212	2,40
PVAd	71,7457	3,0972	7,8482	1,40
LVd	3768,855	4,8666	10,9181	1,64
NVef	2820,435	3,7412	7,7809	0,64
LVAd	1203,635	3,4705	13,6463	2,58
LVdf	42228,443	6,9214	13,6234	1,10

As Figuras 4, 5 e 6, a e b, apresentam as equações de ajuste para todos os solos, considerando-se classes de densidades de acordo com a distribuição obtida com as amostras.

4. Variação de RP com θ e ρ e ajuste da Eq. 8 para os solos RQo e PVAd.Figura 5. Variação de RP com θ e ρ e ajuste da Eq. 8 para os solos LVd e NVef.Figura 6. Variação de RP com θ e ρ e ajuste da Eq. 8 para os solos LVAd e LVdf.

Uma vez conhecendo-se os parâmetros de ajuste (Tabela 3) e a densidade de um dado solo, é possível se estabelecer uma correlação entre RP e θ de modo que se possa normalizar medidas realizadas em diferentes condições de umidade. Essas correlações são de extrema importância para um uso mais correto do penetrômetro de impacto em estudos de compactação do solo.

Os valores de umidade para a normalização da RP devem ser definidos em função do tipo de solo devido às distintas capacidades de armazenamento de água desses solos. Na Figura 7 são apresentadas as curvas de retenção de água medidas para 6 solos, pelo método do aparelho extrator de Richards (Embrapa, 1997) e os respectivos ajustes da função de Van Genuchten (1980). Considerando-se os limites de capacidade de campo como 10 kPa, 33 kPa e 50 kPa, para solos de textura arenosa, média e argilosa, respectivamente, pode-se calcular a umidade da capacidade de campo para cada solo (Tabela 4).

Para um melhor aproveitamento das potencialidades do penetrômetro de impacto é importante que as medidas sejam realizadas nas faixas de umidade estabelecidas entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, uma vez que em solos muito úmidos não há diferenciação da medida e em solos muito secos a medida é muito demorada e dificultada pela excessiva resistência do solo. Mesmo nesta faixa relativamente pequena de umidades, é importante que a umidade seja medida, para uma posterior normalização dos dados de RP, uma vez que esta diferença de umidades pode causar variações da resistência à penetração da ordem de 5 MPa.

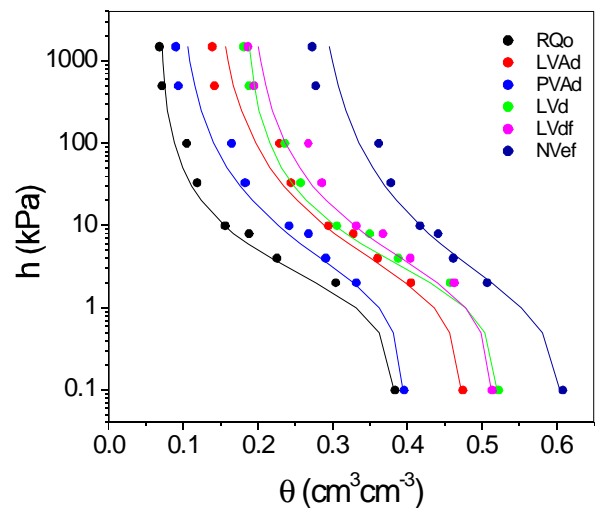


Figura 7. Curvas de retenção da água no solo pelo método de Richards (Embrapa, 1997).

Tabela 4. Potenciais matriciais (h) e umidades da água no solo na capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP).

Solo	h_{CC} (kPa)	θ_{CC} (cm³ cm⁻³)	h_{PMP} (kPa)	θ_{PMP} (cm³ cm⁻³)
RQo	10	0,156	1500	0,074
PVAd	10	0,227	1500	0,107
LVd	33	0,246	1500	0,191
NVef	50	0,355	1500	0,297
LVAd	33	0,232	1500	0,158
LVdf	33	0,271	1500	0,202

Referências Bibliográficas

ASAE. Standards engineering practices data (soil cone penetrometer, S313.2). St. Joseph, 1994. Não-paginado.

BRADFORD, J. M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. (Monograph, 9).

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. Soil Tillage Research, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 15, p. 229-235, 1991.

UPADHYAYA, S. K.; KEMBLE, L. J.; COLLINS N. E. Cone index prediction equations for Delaware soils. [St. Joseph: ASAE], 1982. 4 p. (ASAE Paper, 82-1542). MI 49085.

Comunicado Técnico, 51

Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Rua XV de Novembro, 1542 - Caixa Postal 741
CEP 13560-970 - São Carlos-SP
Fone: 16 274 2477
Fax: 16 272 5958
E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br
www.cnpdia.embrapa.br

1a. edição
1a. impressão 2002: tiragem 300

Comitê de Publicações

Presidente: Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso
Secretária Executiva: Janis Aparecida Baldovinotti
Membros: Dr. Odílio Benedito Garrido de Assis,
Dr. João de Mendonça Naime,
Dr. Rubens Bernardes Filho,
Dr. Washington Luiz de Barros Melo
Membro Suplente: Débora Marcondes B. P. Milori

Expediente

Supervisor editorial: Dr. Odílio B. Garrido de Assis
Revisão de texto: Janis Aparecida Baldovinotti
Tratamento das ilustrações: Valentim Monzane
Editoração eletrônica: Valentim Monzane